

磁気浮上技術を用いた構造物の振動制御

立命館大学 理工学部 機械工学科

上野 哲

1. はじめに

日本をはじめとする地震活動が活発な国々では、耐震、免震、制振（制震）技術が古くから注目を集めている。耐震は強度を上げることにより、大きな揺れがあっても建物が壊れないようにするものである。建物自体は耐えることができるが、家具の転倒などの被害は防ぐことができない。免震は建物と地面を切り離し、建物に揺れが伝わらないようにするもので、高い効果が得られるが、メンテナンスにかかる費用や手間が大きい、既存の建物への導入が難しいなどの課題がある。

制振は、建物にダンパなどの装置を組み込むことで揺れを小さくする技術である。主にパッシブ、セミアクティブ、アクティブに分類される¹⁾。パッシブ制振には、動吸振器や流体粘性ダンパのようなエネルギー吸収装置²⁾が用いられる。安価でエネルギーを必要としないが、設計点から外れると十分な性能が発揮出来ない問題がある。そこで制振装置の剛性や減衰特性を省電力でリアルタイムに調整するセミアクティブ制御^{3,4)}、外部からエネルギーを加えて振動を低減するアクティブ制御が登場した。アクティブ動吸振器(AMD)は、東京千駄ヶ谷インテス⁵⁾などの実際の建築物に導入されている。アクティブ振動制御は高い制振効果が得られるが、付加質量を動かすためにガイドやアクチュエータを必要とし、さらに水平面2方向を制御するには2台の制振装置が必要になるなど、構造が複雑になる問題がある。

これらの問題の解決のため、本研究では磁気浮上技術を応用した制振装置を提案する⁶⁻⁸⁾。浮上体を磁気浮上させると、構造物と浮上体が切り離され構造物が軽くなり、浮上体を構造物に接触させると摩擦が発生するとともに構造物が重くなる。そこで振動の状態に応じて、浮上体の接触・非接触状態を切り替えることにより、摩擦および質量変化による減衰力を発生させる。磁気浮上は、構造物に鉄板を取り付けるだけでよく、複雑なガイド機構を用いる必要がなく、さらに1つの浮上体で2方向への制振力を発生させることが出来る。このため簡単な構造で制振制御を行うことができる。

本報告では、制振原理および住宅モデルを用いた実験による検証結果を報告する。

2. 制振原理

振動制御の原理を図1に示す。横軸に天井の変位 x 、縦軸に天井の速度 \dot{x} をとり、それぞれの正負により浮上体の状態を切り替える。変位と速度が正の場合、すなわち天井が中心位置から離れるように移動している場合、浮上体を天井から浮上させることで天井の慣性を減らし、慣性力によって天井が大きく変位することを防ぐ。次に変位が正で速度が負の場合、すなわち天井が中心位置に戻ろうとする場合、浮上体を天井に接触させて慣性を増やし、復元力による加速度を小さくする。加速度が小さくなると中心位置での天井の速度が低下する。天井の変位が負の場合も同様に、速度が負の場合は非接触状態、速度が正の場合は接触状態とすることで振

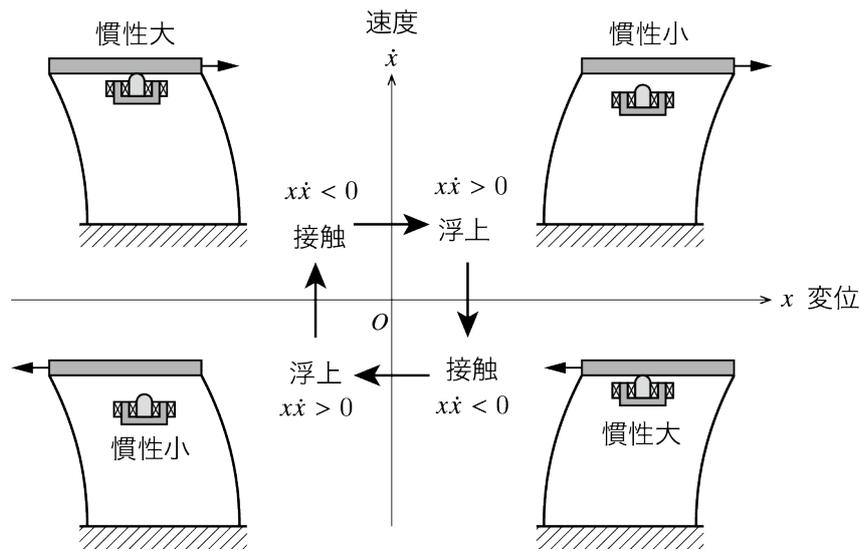


図 1. 振動制御の原理 (文献⁸⁾ より一部修正の上転載)

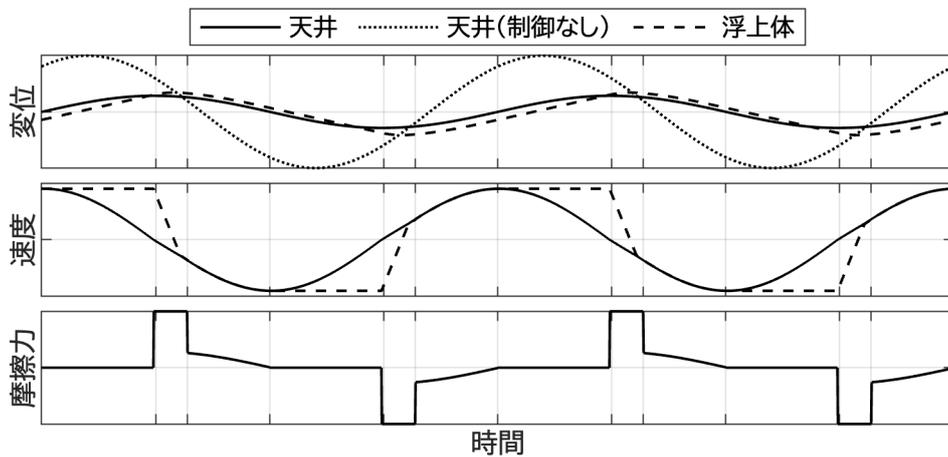


図 2. 振動制御のシミュレーション結果

動を抑制する。また非接触状態から接触状態に移る場合、天井と浮上体の速度差により摩擦が発生する。

振動制御のシミュレーション結果を図 2 に示す。天井の変位がゼロと変位と速度の積が正の時は非接触であるため摩擦力がゼロとなる。積が負となると接触状態に変わる。このとき天井の速度がゼロであるのに対して浮上体は正の速度を持っているため、速度差によりクーロン摩擦が生じる。この摩擦によって振動のエネルギーが熱に変換される。そして浮上体の速度が天井と同じになると、浮上体を天井に固定するように摩擦力が発生する。天井と浮上体は同じ方向に移動しているので、天井には浮上体を押す反力が減衰力のように作用する。このため浮上体が天井に接触している間、摩擦および慣性力による減衰力が発生する。

実際の構造物では天井の絶対変位を測定することは困難であるので、天井の加速度を測定する。加速度を用いる場合、加速度と速度は向きが反対となるので、次式に従って浮上体の状態を切り替える。

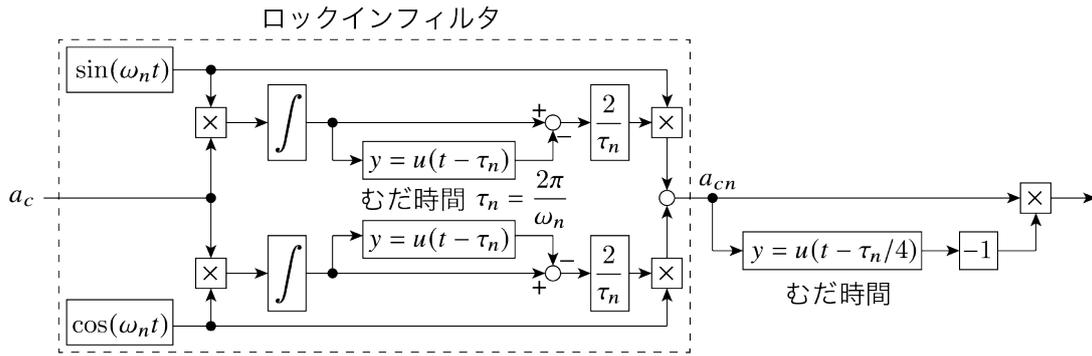


図3. ロックインフィルタと状態切り替え信号の算出 (文献⁸⁾より一部修正の上転載)

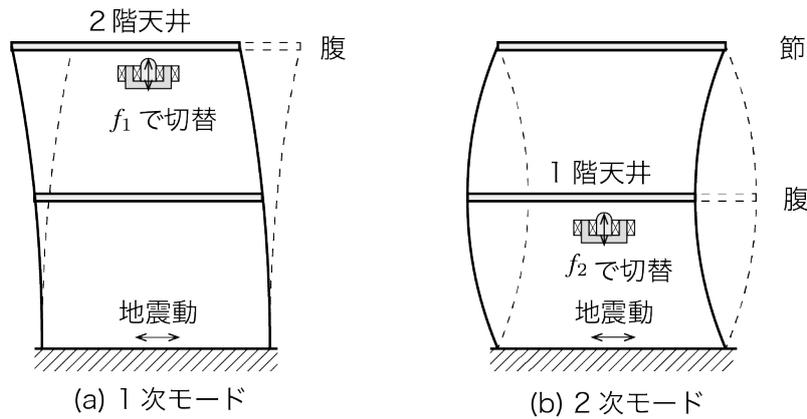


図4. モード制御 (文献⁸⁾より一部修正の上転載)

$$\begin{cases} \text{非接触} & x\ddot{x} < 0 \\ \text{接触} & x\ddot{x} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

さらに水平方向の固有振動数が同じであれば 2 方向の振動に対しても制御可能となる。水平 2 方向の場合は次式によって浮上体の状態を切り替える。

$$\begin{cases} \text{非接触} & x\ddot{x} + y\ddot{y} < 0 \\ \text{接触} & x\ddot{x} + y\ddot{y} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

また地震動のような多くの周波数成分を含む振動の場合、構造物は固有周波数 f_n [Hz]で大きく揺れるため、固有振動成分の振動振幅を低減させる。加速度信号から f_n 成分を取り出すため、図3に示すロックインフィルタを用いる。ただし ω_n は固有角周波数を表し、 $\omega_n = 2\pi f_n$ である。フィルタを用いることで、リアルタイムで f_n 成分の加速度 a_n を取り出す。速度は加速度を1/4周期分遅延させた信号に-1を掛けた向きとなる。これらの信号を掛け合わせ浮上体の状態を切り替える。

振動モードごとの制御方法を図4に示す。2階建て住宅の場合、振動モードは1次振動モードと2次振動モードが存在する。1次振動モードを制御する場合は、振動の腹となる2階の天井に浮上体を取り付け、1次振動モードの固有振動数 f_1 により切り替えを行う。1階天井に取り付けた場合は変位が小さくなるため効果は低くなる。2次振動モードを制御する場合は、1階の天井に浮上体を取り付け、2次振動モードの固有振動数 f_2 で切り替える。

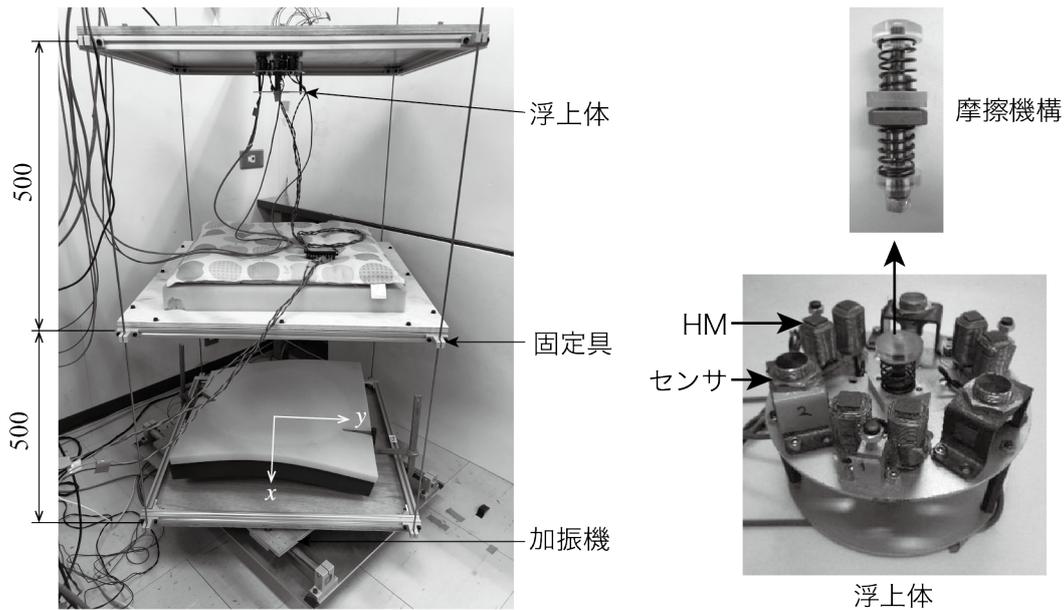


図5. 実験装置（文献⁸⁾より一部修正の上転載）

3. 実験装置

本研究の実験装置を図5に示す。2階建て住宅を模した小型の住宅モデルを用いた。浮上体の磁気吸引力を受けるため、1階天井と2階天井に鉄板を貼り付けている。装置の土台部にモータとボールネジを用いて製作した加振機を設置し、1方向の加振を行う。実験では住宅モデルの天井を挟み、柱の固定具が向かい合う方向を x 軸とし、それに直交する向きを y 軸とした。加振機はモータドライバに変位の指令値を与えることで制御する。

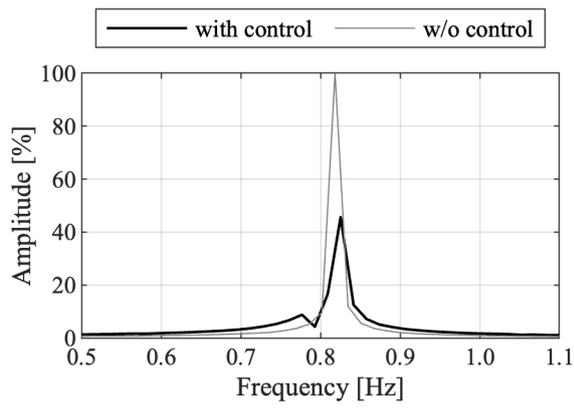
浮上体は、中央にコイルバネとリニアガイド、摩擦板からなる摩擦機構を取り付け、浮上体と天井のエアギャップを変化させることで、摩擦板に働く垂直抗力を調整する。最大2Nまでの垂直抗力が発生できる。そして永久磁石と電磁石を組合せたハイブリッド磁石(HM)を3個使い、浮上位置と姿勢の制御を行う。3個の変位センサにより浮上位置と姿勢を測定し、制御を行なった。浮上体の浮上制御には外乱に強いスライディングモード制御を用いた。

4. 実験結果

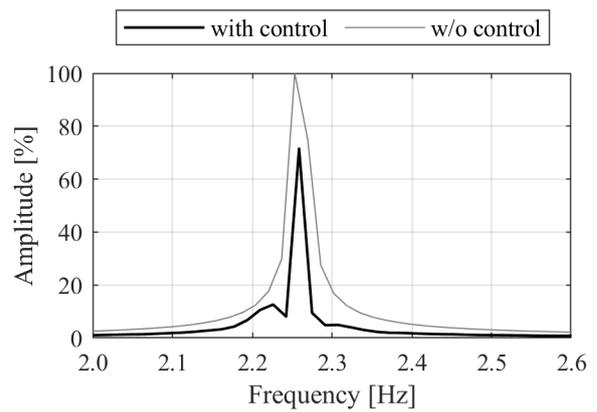
実験結果を示す。なおここで示す結果は文献⁸⁾から引用したものである。

まず住宅モデルの固有周波数を測定した。住宅モデルに衝撃力を与え、自由応答の加速度波形を高速フーリエ変換解析で固有周波数を推定した。 x 、 y 方向とも1次モードは0.82 Hz、2次モードは2.26 Hzであった。

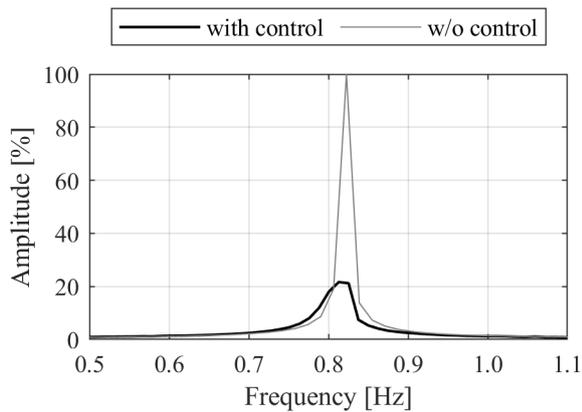
次にモデルの土台を正弦波で加振した時の実験結果を示す。1次モードの実験では浮上体を2階天井のみに取り付け、2次モードの実験では1階天井のみに取り付けた。垂直抗力の大きさが、2.0 Nとなるように接触時の浮上位置を定めて実験を行った。



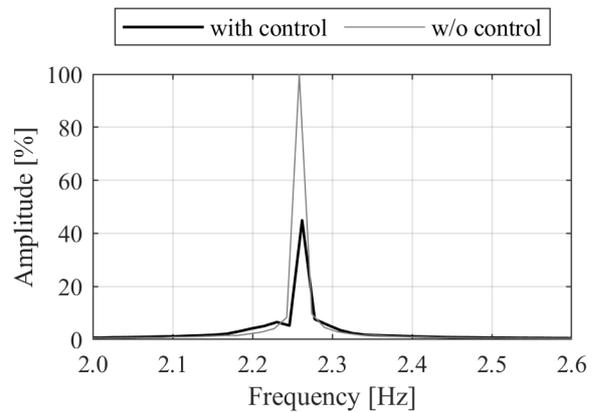
(a) x方向



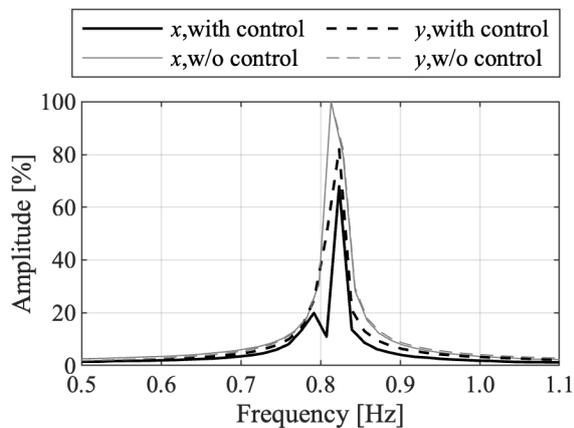
(a) x方向



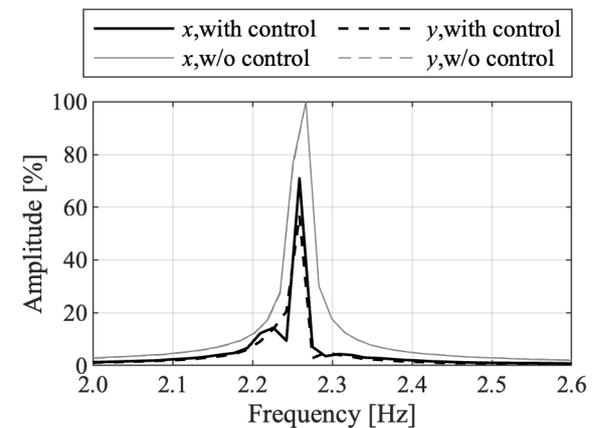
(b) y方向



(b) y方向



(c) 45°方向

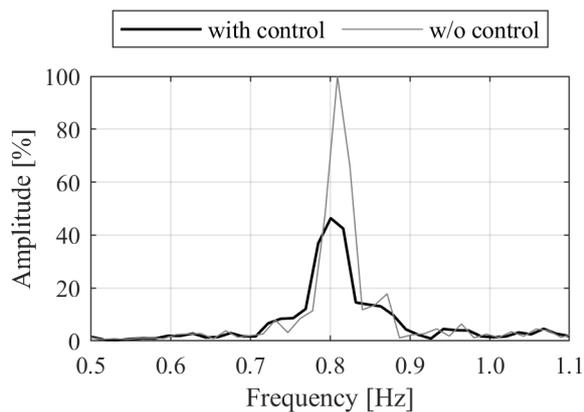


(c) 45°方向

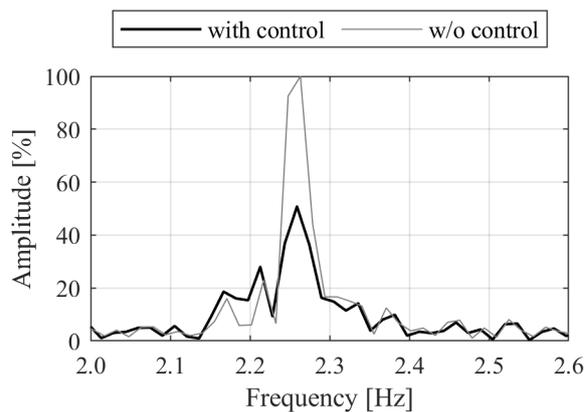
図6. 正弦波加振結果 (1次モード) (文献⁸⁾より転載)

図7. 正弦波加振結果 (2次モード) (文献⁸⁾より転載)

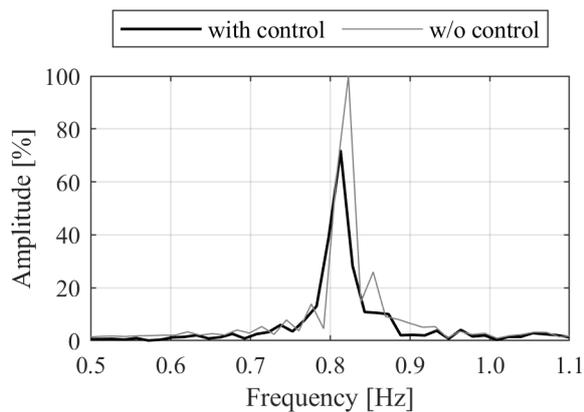
定常波の周波数は固有周波数を用い、1次モードでは0.82 Hz、2次振動モードでは2.26 Hzとした。実験は、1次モード、2次モードのそれぞれでx軸方向、y軸方向、住宅モデルを45°回転させた斜軸方向で加振を行った。図6に1次モードの周波数応答、図7に2次モードの周波数応答を示す。非制御時の振幅の最大値を100%とし、制振時の振幅を比で示している。1次モード、2次モード共に提案手法により制振対象の振幅が抑えられていることがわかる。ただしy軸方向の制振効果は大きい、それに比べてx軸方向の制振は小



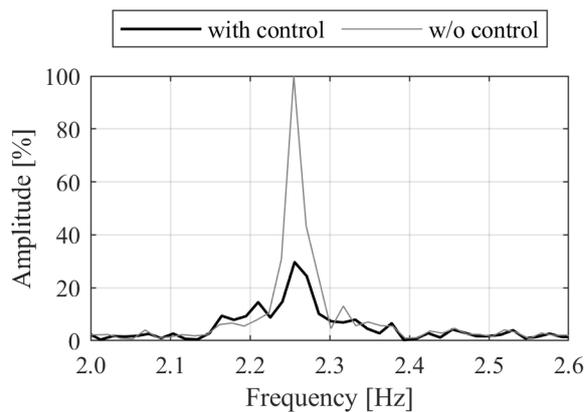
(a) x方向



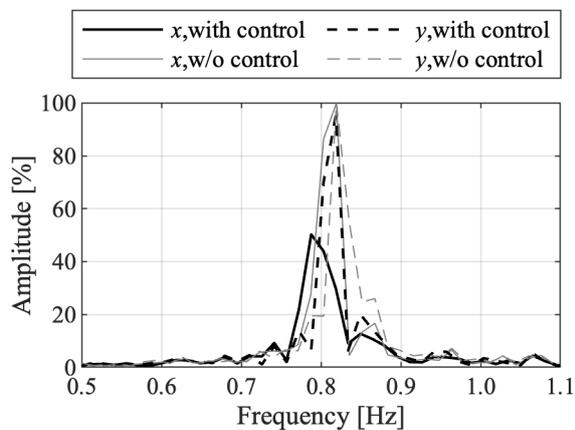
(a) x方向



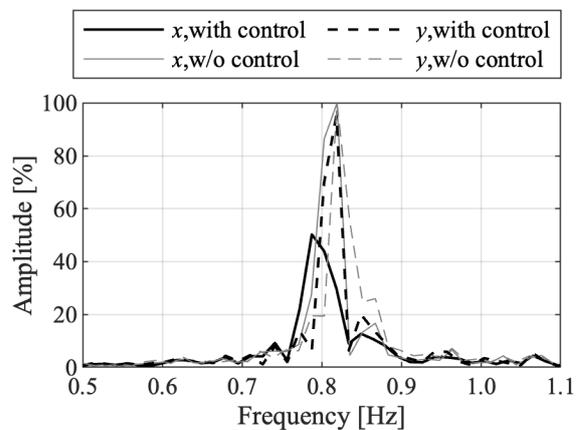
(b) y方向



(b) y方向



(c) 45°方向



(c) 45°方向

図8. ランダム加振結果 (1次モード) (文献⁸⁾より転載)

図9. ランダム加振結果 (2次モード) (文献⁸⁾より転載)

さいことが確認できる。この原因として、制振システムで設定した周波数と住宅モデルの固有周波数の間に差があることが挙げられる。制振システムは、指定し周波数で制振するため、わずかでもずれると効果が小さくなる。

次にランダム波を用いた加振実験を行った。ランダム波加振の波形は、固有振動数付近を中心に幅広い周波数成分を含むように作成した。図8に1次モードを中心とする加振に対する実験の周波数応答を示す。また図9に2次モードを中心とする加振に対する実験の

周波数応答を示す。定常波加振の時と同様に、ランダム波加振においても固有振動数付近の振幅が小さくなっていることが確認できる。図9(c)のy方向は、制御なしの場合の振幅が小さくなったため、制振効果が小さくなっている。

9. まとめ

本研究では、磁気浮上体の非接触・接触状態の切り替えによる構造物の振動制御手法を提案し、定常波およびランダム波で地面を加振した時の振動抑制効果を実験により検証した。構造物の1次モード、2次モードの腹に浮上体を設置し、モード周波数にあわせて切り替えを行うことで共振での振動振幅の抑制できることを確認した。

今後は、本研究で得られた成果を実際の建物や機械の振動抑制に応用していく予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 背戸 一登, 構造物の振動制御, コロナ社, 2006.
- 2) J. Q. Sun, M. R. Jolly, and M. A. Norris, Passive, Adaptive and Active Tuned Vibration Absorbers- A Survey, Transactions of the ASME, Vol. 117, pp. 234-242, 1995, doi 10.1115/1.2836462.
- 3) N. Jalili, A Comparative Study and Analysis of Semi-Active Vibration-Control Systems, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 124, pp. 593-605, 2002, doi 10.1115/1.1500336.
- 4) G. Nelson et al., Bridge Life Extension Using Semiactive Vibration Control, IEEE/ASME Tran. on Mechatronics, Vol. 20, No. 1, pp. 207-216, 2015, doi 10.1109/TMECH.2014.2316211.
- 5) M. Yamamoto et al., Practical applications of active mass dampers with hydraulic actuator, Earthquake Engng Struct. Dyn., Vol. 30, pp.1697-1717, 2001, doi: 10.1002/eqe.88.
- 6) C. Jiang and S. Ueno, Study on vibration control system of structures based on magnetic levitation technology, Mechanical Engineering Journal, Vol. 7, No. 1, 2020, doi: 0.1299/mej.19-0030.
- 7) 藤本 恵五, 上野 哲, 趙 成岩, 磁気浮上体の接触・非接触状態の切り替えによる構造物の振動制御-定常波およびホワイトノイズ加振下での制振効果の検証-, 日本 AEM 学会誌, Vol. 31, No. 2, 2023, pp. 127-133.
- 8) 田中 創, 上野 哲, 趙 成岩, 加速度信号を用いた浮上体の状態切替による構造物の振動制御, 日本 AEM 学会誌, Vol. 32, No. 2, pp. 258-263, 2024.